

## 用于 MPLS 流量工程的最小延时和最小干扰路由算法

付晓, 李兴明

(电子科技大学 通信与信息工程学院, 成都 611731)

(3kphantom@gmail.com; xingmingl@uestc.edu.cn)

**摘要:**借鉴最小干扰路由算法(MIRA)的思想,提出一种最小延时和最小干扰路由算法MDMI,以实现用于多协议标签交换(MPLS)流量工程的服务质量(QoS)路由方案。该算法首先选择 $k$ 条最小延时候选路由,然后通过网络流计算避开关键链路选路。该算法在实现负载均衡、提高网络资源利用效率的同时提供了一种延时控制方式。仿真结果表明,该算法以 $k$ 倍时间复杂度提升为代价,在满足标签转发路径(LSP)请求和资源利用率方面能达到较好的性能。

**关键词:**多协议标签交换; 流量工程; 服务质量; 路由; 网络流

**中图分类号:** TP393.03 **文献标志码:** A

### Minimum delay and minimum interference routing algorithm for multi-protocol label switch traffic engineering

FU Xiao, LI Xing-ming

(School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

**Abstract:** Based on the idea of Minimum Interference Routing Algorithm (MIRA), a Minimum Delay Minimum Interference (MDMI) routing algorithm was proposed to implement QoS-based routing scheme for Multi-Protocol Label Switch (MPLS) traffic engineering. The algorithm firstly calculated  $k$  minimum delay candidate routes, selected optimal route and avoided critical resource through computing network flow. The algorithm can balance overall load, improve resource utilization efficiency and offer a delay-constrained routing mechanism at the same time. The simulation results show that the new algorithm works better at decreasing Label Switched Path (LSP) rejection rate and increase network throughput, however at the cost of  $k$  times multiplication of time complexity.

**Key words:** Multi-Protocol Label Switch (MPLS); traffic engineering; Quality of Service (QoS); routing; network flow

## 0 引言

多协议标签交换(Multi-Protocol Label Switching, MPLS)旨在实现数据分组的快速转发,使用扩展的资源预留协议(Resource Reservation Protocol, RSVP)或者标签分配协议(Label Distribution Protocol, LDP),为分组建立一条入口路由器到出口路由器的标签转发路径(Label Switched Path, LSP)。通过MPLS流量工程技术,在标签转发路由器(Label Switching Router, LSR)上,对不同转发等价类(Forwarding Equivalence Class, FEC)的数据包进行转发,实现“下一跳转发行为”(Next Hop Behavior, NHB),可以实现对业务的带宽、延迟控制,从而对服务质量进行保障。为此,首先要解决的是基于服务质量的路由算法,这些算法在实现时需要兼顾可行性和复杂度,即“受限”的路由算法。

在最短路径算法的基础上,首先被提出的是最宽—最短路径(Widest Shortest Path, WSP)<sup>[1]</sup>和最短—最宽路(Shortest Widest Path, SWP)。Wang等人更进一步引入了链路带宽利用率<sup>[3]</sup>,选路时最小化所选路径的最大链路带宽利用率。此类算法均考虑了带宽,属于负载均衡的算法,由于只关心单条路径带宽和当前业务的带宽需求,网络容易产生瓶颈效应导致拥塞,因而资源利用率较低。

最小干扰路由算法(Minimum Interference Routing Algorithm, MIRA)<sup>[4]</sup>开辟了新的思路,提出了关键链路的概念并参考了可能产生需求的源目节点对信息,在尽量不干扰其他节点对的情况下对某个节点对的业务需求进行路由。所谓的“干扰”是通过最大流<sup>[5]</sup>计算的——路由由某节点对的业务可能会使得其他节点对间最大流值变小。尽管如此,MIRA也存在一些缺点:仅将链路区分为关键和非关键的而忽略了某些重要的瓶颈链路(如Wang Bing等人提到的汇聚和分发型拓扑中的fat链路<sup>[6]</sup>),为此,学者们提出了许多改进,像关键度函数<sup>[6]</sup>、关键度级别<sup>[7]</sup>和关键度阈值<sup>[8]</sup>等;MIRA绕开关键链路选路,却往往可能选择过长或带宽过低的路径,这对于资源也是一种浪费,LCBR(Link Criticality Based Routing)<sup>[9]</sup>预先选择 $k$ 条WSP或SWP作为关键路径,并按链路所属路径级别来构造链路代价,尽量选择类似WSP或SWP的路由;此外其只适用于单一带宽限制的QoS选路,不能实现其他如延迟类的策略控制。

本文在MIRA的基础上提出一种结合 $k$ 最短路径实现最小延迟和最小干扰(Minimum-Delay-Minimum-Interference, MDMI)算法,该算法能够选择低延迟且使得最大流“最大”的路由。经过仿真证明,算法性能较最短路径(Short Path First, SPF)算法、WSC算法<sup>[6]</sup>等性能有所提高。

收稿日期:2010-10-09;修回日期:2010-12-01。 基金项目:2009中兴通讯基金资助项目。

作者简介:付晓(1986-),男,重庆涪陵人,硕士研究生,主要研究方向:宽带网络; 李兴明(1956-),男,云南昆明人,教授,博士,主要研究方向:光纤通信、光交换与自动光网络。

## 1 问题模型

本算法在最小干扰方面需求同 MIRA 一致,假设有一个表示为(源节点,目的节点,带宽)的 LSP 请求  $(a, b, D)$ ,将网络表示为有向图  $G(N, L, \hat{B})$ ,  $N, L$  分别为节点集和链路集,维度分别为  $n$  和  $m$ ;  $M$  是图  $G$  的邻接矩阵;向量  $\hat{B}, \hat{R}$  分别表示链路的物理带宽和剩余带宽;维度为  $p$  的集合  $P$  表示可能有业务需求的源目节点对;  $(s, d)$  中  $s$  和  $d$  分别为源和目的节点。算法需求描述如下:

$$\text{Maximize } I(\hat{\theta}) \quad (1)$$

$$M\hat{x}^{sd} = \theta_{sd}\hat{e}^{sd}; \forall (s, d) \in P \setminus (a, b) \quad (2)$$

$$M\hat{x}^{ab} = -D\hat{e}^{ab} \quad (3)$$

$$\hat{x}^{sd} + \hat{e}^{ab} \leq \hat{R}; \forall (s, d) \in P \setminus (a, b) \quad (4)$$

$$\hat{x}^{sd} \geq 0; \forall (s, d) \in P \quad (5)$$

$$\hat{x}^{ab} \in \{0, D\}^m \quad (6)$$

以上  $\theta_{sd}$  为  $(s, d)$  点对之间的最大流值,其在所有链路上承载的流量构成向量  $\hat{x}^{sd}$ ;将所有的节点对最大流值表示为向量  $\hat{\theta}$ ,  $I(\hat{\theta})$  是关于最大流的目标函数;向量  $\hat{e}^{sd}$  中对应节点  $s$  和  $d$  的元素为 1 和 -1,其余为 0。式(2)(3)(5)(6) 是节点对最大流和 LSP 请求带宽的承载的限制;式(4) 表示占用带宽不能超过链路可用带宽。式(1) 是算法需求,即如何使其他节点对的最大流最大,有三种策略<sup>[4,10]</sup>。

1) MAX-MIN-MAX,即求所有节点对最大流值中最小值最大:

$$\text{Maximize } z \quad (7)$$

$$z \leq \alpha_{sd}\theta_{sd}; \forall (s, d) \in P \setminus (a, b), \alpha_{sd} \text{ 为权重} \quad (8)$$

2) WSUM-MAX,即求所有节点对最大流值加权和最大:

$$\text{Maximize } \sum_{(s, d) \in P \setminus (a, b)} \alpha_{sd}\theta_{sd} \quad (9)$$

3) LEX-MAX<sup>[10]</sup>。策略 1) 和 2) 只考虑了单个或者所有节点对最大流的和,然而不同节点对的优先级是不同的。简单地说就是优先选择使点  $a$  流值最大的路径,如果  $a$  流值相同,则选择使次优先级点  $b$  流值最大的路径,并以此类推。

## 2 算法实现

尽管 MIRA 进行了复杂的最大流计算,但仍然只是“启发式”地达到最大化最大流的效果,且只适用于单一带宽限制。与之不同,本文算法将选路分为两个阶段:第一阶段计算依据时延构造链路代价选择  $k$  条满足时延最小的备选路径,实现了对时延的控制;第二阶段,计算每条路径启用后的最大流值,取确实满足上述模型“最大”要求的路径为所求。

### 2.1 求 $k$ 最小延时路由

按照时延构造链路代价的方案在一些介绍 QoS 路由的文章中已经提及,本文提出一种简单的利用中间节点的流入和流出带宽利用率的平均值来估算路径延迟的方法。网络延迟主要有光纤传播延迟和节点设备延迟,前者相对后者一般可以忽略。节点延迟同节点待转发的业务量和其处理能力有关——基于这个观点,可以通过节点带宽利用率来估算其延迟进而得到链路延迟代价:利用 Xu 等人提出的估算节点带宽利用率的方法<sup>[11]</sup>求得向量  $\hat{T} = M\hat{R}$  和  $\hat{Q} = M\hat{B}$ ,其元素  $T(i)$  和  $Q(i)$  分别对应以节点  $i$  为首尾节点的链路剩余带宽之差和链路物理带宽之差。而如果分别将  $M$  中值为 -1 和 +1

的元素置 0(记为  $M^+$  和  $M^-$ ) 可以计算从  $i$  节点“流出”和“流入”链路的剩余带宽:

$$\hat{T}^+ = M^+ \hat{R} \quad (10)$$

$$\hat{T}^- = M^- \hat{R} \quad (11)$$

对于物理带宽同理,  $i$  节点的带宽利用率为:

$$w_i = \left[ \left( 1 - \frac{T^+(i)}{Q^+(i)} \right) + \left( 1 - \frac{T^-(i)}{Q^-(i)} \right) \right] / 2 = 1 - \left( \frac{T^+(i)}{Q^+(i)} + \frac{T^-(i)}{Q^-(i)} \right) / 2 \quad (12)$$

然后用首节点带宽利用率估算链路延迟,末节点的延时贡献会被计入各选路径的下一条链路上。设节点轻载和满载时的延时分别为  $t_i$  和  $T_i$ ,将链路  $(i, j)$  的延迟代价构造如下:

$$w_{ij} = t_i + (T_i - t_i)w_i \quad (13)$$

然后删除带宽不足业务带宽的链路,用  $k$  最短路算法<sup>[12]</sup> 求  $k$  条延迟最短的路径集  $X$ 。

### 2.2 利用最大流选路

MIRA 是启发式算法,不直接按照算法需求式(1) 计算路由,转而构造链路代价用于 SPF 选路,但“关键性”的判断标准有待商榷且容易导致选择多跳路径。本文算法对其进行了改进:按照  $X$  中的备选路径  $x$  更新网络带宽后,计算各节点对的最大流值并严格按照 WSUM-MAX, MAX-MIN-MAX 或者 LEX-MAX 策略求和后,选取最大流之和最大的路由即为所求。算法的步骤如下:

1) 有向图  $G(N, L, \hat{B})$ ,  $N, L$  分别为节点集和链路集,维度分别为  $n$  和  $m$ ,  $M$  是图  $G$  的邻接矩阵;

2) 向量  $\hat{B}, \hat{R}$  分别表示链路的物理带宽和剩余带宽,  $\hat{T}$  表示节点设备的最大延迟;

3) 维度为  $p$  的集合  $P$  表示可能有业务需求的源目节点对,每个元素  $(s, d)$  中  $s$  为源节点,  $d$  为目的节点,每个节点对的权重为  $\alpha_{sd}$ ;

4) LSP 请求  $(a, b, D)$ ,  $a, b, D$  分别为源节点、目的节点、请求带宽。

输出:  $a$  到  $b$  的一条带宽为  $D$  的路由。

处理流程:

1) 图  $G$  中剩余容量  $R(l) < D$  的链路,得到导出图  $G'$ ,按照式(1) 构造链路代价。

2) 对请求  $(a, b, D)$  使用  $k$  最短路算法,计算  $k$  条最短路,直到找到  $k$  条路或者找不到可行路由为止,求得路径集  $X$ 。

3) 遍历集合  $X$ , 设  $i = 1$ ;

a) 根据第  $i$  个路由,重新更新原网络  $G$  的链路容量导出图  $G''$ ,计算  $P \setminus (a, b)$  中各节点对的最大流值;

b) 按照式(7)、(8) 或者 LEX-MAX 策略,计算各个节点对最大流之“和”;

c)  $i$  是否大于  $|X|$ , 是则转 4), 否则  $i = i + 1$  转 1)。

4) 求最大流之“和”最大的路径为所求。

5) 沿着所求路径建立 LSP,更新图  $G$  的容量。

### 2.3 复杂度分析

理论上计算  $k$  条最短路算法的时间复杂度为  $O(mn^2)$ ,如果在第一阶段使用背离路径的  $K_b$  最短路算法,通常情况下的时间复杂度远小于  $O(mn^2)$ <sup>[12]</sup>;第二阶段每使用最高标签预流推进算法<sup>[5]</sup> 计算一个节点对的最大流需要  $O(n^2 \sqrt{m})$ ,总共有  $(p - 1)$  个节点对,  $k$  条路径,算法复杂度为  $O(k(p - 1)n^2 \sqrt{m})$ ,所以最大流选路为主要的开销部分。总的来说,该方案较 MIRA 复杂度<sup>[4]</sup>  $O((p - 1)n^2 \sqrt{m})$  增大了  $k$  倍,

但  $k$  一般设置得比较小, 所以同 MIRA 属于同一复杂度级别。这种方式严格实现 MIRA 所提出的“最大”化模型需求, 且考虑了延迟最小化, 如果在第一阶段使用其他受限路由算法可以提供对其他 QoS 参数的支持。

### 3 仿真对比

下面通过仿真来比较算法的性能, 使用著名的 K-L 网络拓扑与 SPF 和 WSC 加以对照, 如图 1 所示。图 1 中标示出了 5 个源目的节点对, 细线和粗线代表的光纤容量分别为 1200 和 4800 单位, 且都是双向的。LSP 请求在 5 个节点对之间随机生成, 请求带宽均匀分布在 [1, 4] 内, LSP 建立后一直存在。总共产生 7500 个请求, 分别采用 SPF 和 WSC 以及 MDMI ( $k$  设置为 5) 进行模拟, 由于其他算法中没有涉及延迟, 为了在相同条件下进行对比, 将所有节点延迟下限和上限都设为 1。仿真得到的请求拒绝率和网络吞吐量即被接受的请求带宽之和如图 2、3 所示, WSC 和 MDMI 的时间开销对比如图 4 所示。

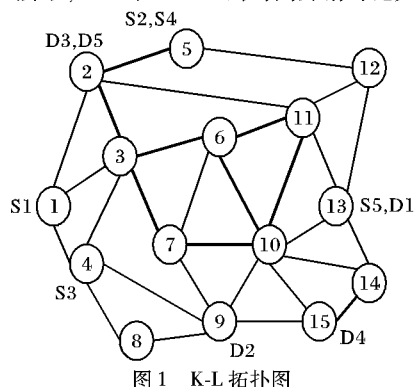


图 1 K-L 拓扑图

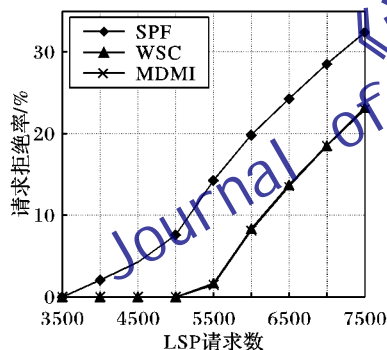


图 2 LSP 请求被拒绝数

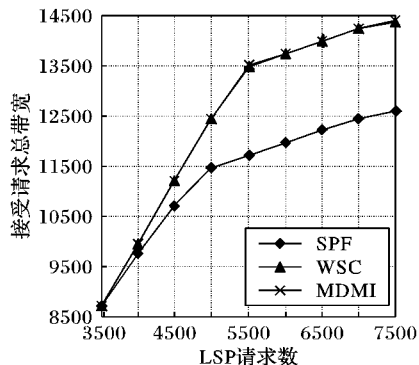


图 3 请求接受的带宽总量

由仿真结果可知, 本文算法 MDMI 比 SPF 有低得多的请求拒绝率, 也有更高的带宽接受率, 这意味着算法能够更高效地利用网络资源; 同 WSC 相比有几乎一样的性能, 甚至有些许提高 (如表 1), 而 WSC 已经被证明了在这些方面优于 MIRA<sup>[6]</sup>。相对于 MIRA, 尽管 MDMI 算法要承受更高的复杂度, 但这个提高只是常数倍的 (如图 4, 由于采用了 5 条候选

最短路, MDMI 的时间开销是 WSC 的 5 倍左右, 这同 2.3 节时间复杂度的结论一致), 并且在换来性能提升的同时还提供了一种对时延的控制方式。

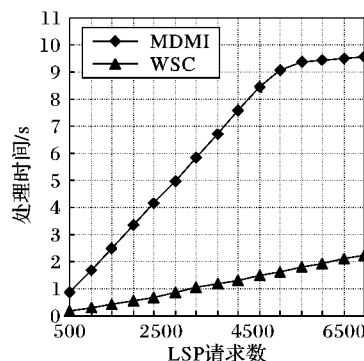


图 4 算法时间开销对比

表 1 被拒绝请求数 (“拒绝数”) 和接受总带宽 (“总带宽”)

请求数	MDMI		WSC		SPF	
	拒绝数	总带宽	拒绝数	总带宽	拒绝数	总带宽
3500	0	8723	0	8723	0	8723
4000	0	9951	0	9951	82	9758
4500	0	11216	0	11216	194	10725
5000	0	12447	0	12447	384	11470
5500	85	13514	92	13500	786	11726
6000	488	13750	495	13736	1189	11962
6500	881	14010	888	13996	1582	12222
7000	1293	14237	1300	14233	1994	12449
7500	1716	14400	1735	14382	2428	12661

### 4 结语

本文借鉴 MIRA 提出一种使用  $k$  最短路实现最小延迟的最小干扰 (MDMI) 算法, 该算法能够选择低延迟且使得其他节点对的最大流“最大”的路由。经过仿真证明, 其性能较 SPF、WSC (关键度函数) 等性能有所提高。尽管此类算法的具体实现都是启发式的, 各有各的优缺点和适用场景, 但本文的 MDMI 算法也不失为 QoS 路由的一种解决思路, 而更精妙、合理的算法有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] GUERIN R A, ORDA A, WILLIAMS D. QoS routing mechanisms and OSPF extensions [C]// GLOBECOM '97: IEEE Global Telecommunications Conference. Washington, DC: IEEE, 1997, 3: 1903-1908.
- [2] WANG ZHENG, CROWCROFT J. Quality-of-service routing for supporting multimedia applications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14 (7): 1228-1234.
- [3] WANG YUFEI, WANG ZHENG. Explicit routing algorithms for Internet traffic engineering [C]// Proceedings of Eight International Conference on Computer Communications and Networks. Washington, DC: IEEE, 1999: 582-588.
- [4] KODIALAM M, LAKSHMAN T V. Minimum interference routing with applications to MPLS networks [C]// INFOCOM 2000: IEEE Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Washington, DC: IEEE, 2000, 2: 884-893.
- [5] GOLDBUG A V, TARJAN R E. Solving minimum cost flow problem by successive approximation [C]// STOC '87: Proceedings of the 19th ACM Symposium on the Theory of Computing. New York: ACM, 1987: 7-18.

(下转第 934 页)



且切换时间间隔变化较大。

## 2) 最短路径传播时延。

利用本文的通信网络为空间站和地面站提供通信的传播时延情况如图8所示。

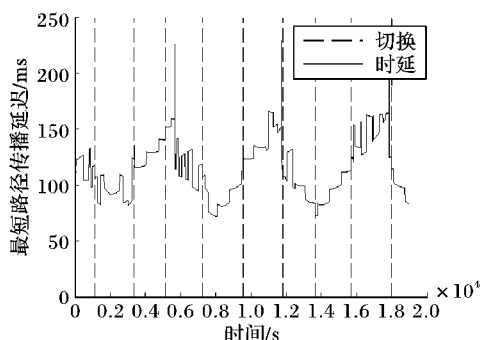


图8 空间站与地面站通信的时延和切换随时间变换情况

从图8可以看出,本网络中最短路径传播时延经过一段平稳变化后会发生一次突变,突变的原因是由于空间站与通信卫星发生链路切换以及通信卫星与地面站发生链路切换产生的,由于采用了同向转动的卫星环为空间站提供接入服务,使得发生链路切换的频率降低,从而使传播时延发生突变的频率较低。另外,可以看到时延有3个尖峰,这是由于当中、低轨道卫星的星间链路变化时,发送的数据包需要重新选路所造成的。

## 3) 网络平均吞吐量比较。

本文的通信网络与 Teledesic 系统的网络平均吞吐量如图9所示。

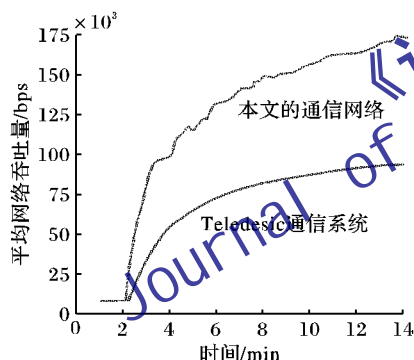


图9 本文的空间通信网络与 Teledesic 系统的网络平均吞吐量比较

从图9可以看出,本文的基于IP的空间通信网络的平均吞吐量比 Teledesic 系统有大的提高。这主要是因为本文的IP协议中对SNACK选项进行压缩,降低了空地反向链路

ACK的丢失几率,从而降低了数据重传的可能性,提高了数据传输的可靠性。

## 4 结语

本文设计了一种基于IP的空间通信网络模型,分析和设计了网络的关键技术。最后,对该网络的空间通信能力进行了仿真,并与商业通信系统 Teledesic 的通信能力进行了对比。实验表明,该空间通信网络可以有效减少航天器与接入卫星间的切换频率和通信时延,具有给空间航天器提供长时间稳定通信的能力,同时,网络的业务吞吐能力较强,能够满足空间数据通信的需求。下一步将重点研究空间接入路由器的通信机制,从而实现空间网络和地面网络的无缝链接。

## 参考文献:

- [1] 魏晨曦. TCP/IP 技术在航天测控通信中的应用[J]. 无线电工程, 2005, 35(8): 21-24.
- [2] 王家胜. 数据中继卫星系统的研制与分析[J]. 航天器工程, 2008, 17(5): 7-11.
- [3] EL-GENDY M A, BOSE A, SHIN K G. Evolution of Internet QoS and support for soft real-time applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(7): 1086-1104.
- [4] CAINI C, FIRRINCIELI R. Transport layer protocols and architectures for satellite networks[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2006(2): 34-36.
- [5] IANCIC W L. Architecture study of space-based satellite networks for NASA missions [C]// IEEE Aerospace Conference Proceedings. Washington, DC: IEEE, 2003, 3: 1179-1186.
- [6] 王玮. 一体化测控网协议的研究与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [7] 黄科. TCP 协议在空间通信中的应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [8] 蒋立正. IP over CCSDS 空间组网通信关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
- [9] 苏年乐, 王晓双, 李群, 等. 基于 Eclipse 平台的导航仿真系统集成[J]. 计算机应用, 2008, 28(3): 779-781.
- [10] KARAPANTAZIS S, PAVLIDOU F. Broadband communications via high-altitude platforms: a survey [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2005, 7(1): 29-31.
- [11] 于伟. NGN 网络 QoS 的分析和保障[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [12] 王芳. 基于主动策略 IP 网络生存性关键问题的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2009.

(上接第930页)

- [6] WANG BING, SU XU, CHEN C L P. A new bandwidth guaranteed routing algorithm for MPLS traffic engineering [C]// ICC 2002: IEEE International Conference on Communications. Washington, DC: IEEE, 2002, 2: 1001-1005.
- [7] TAPOLACAI J, FODOR P, RETVAI G, et al. Class-based minimum interference routing for traffic engineering in optical networks [C]// Next Generation Internet Networks. Washington, DC: IEEE, 2005: 31-38.
- [8] RETVARI G, BIRO J J, CHINKLER T, et al. A precomputation scheme for minimum interference routing: the least-critical-path-first algorithm[C]// INFOCOM 2005: 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Washington, DC: IEEE, 2005, 1: 260-268.
- [9] ILIADIS I, BAUER D. A new class of online minimum-interference

routing algorithms [C]// NETWORKING 2002: Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; Mobile and Wireless Communications, LNCS 2345. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 959-971.

- [10] KAR K, KODIALAM M, LAKSHMAN T V. MPLS traffic engineering using enhanced minimum interference routing: An approach based on lexicographic max-flow [C]// IWQOS 2000: Eighth International Workshop on Quality of Service. Washington, DC: IEEE, 2000: 105-114.
- [11] XU YING-XIAO, ZHANG GEN-DU. Models and algorithms of QoS-based routing with MPLS traffic engineering [C]// 5th IEEE International Conference on High Speed Networks and Multimedia Communications. Washington, DC: IEEE, 2002: 128-132.
- [12] 傅俊伟, 李兴明, 陈捷. 基于背离路径的 Kth 最短路径实用搜索算法[J]. 西安: 计算机技术与发展, 2009, 19(2): 120-122.